

# 川藏公路二郎山龙胆溪滑坡滑动机理与整治

刘小丽,周德培

(西南交通大学岩土工程系,四川 成都 610031)

**摘 要:**通过对二郎山龙胆溪滑坡的环境地质条件和滑坡基本特征的分析,对该滑坡的各种影响因素和滑坡的发生、发展机理进行了研究,在此基础上阐明了滑坡的综合整治工程方案。

**关键词:**龙胆溪滑坡;滑动机理;整治方案

**中图分类号:**P642.22 **文献标识码:**A

川藏公路 K2 730 ~ K2 732 路段滑坡位于四川省天全县两路乡龙胆溪右岸,是由四川进入西藏的必经之路,川藏公路沿山坡在海拔 1 979m ~ 2 050m 的基岩剥蚀台坝蜿蜒通过。该路段滑坡变形始于 1997 - 07 ~ 08 的连续暴雨之后,滑坡体的变形和公路的破坏严重且呈现出扩大的趋势,如不及时整治,势必会影响甚至中断公路的正常运营,为此有关单位对该滑坡体的滑动机理进行了分析研究并实施了相应的整治工程,目前整治工程正在进行中。

## 1 滑坡的环境地质条件

该滑坡所处路段的台阶状地形地貌特征突出,为龙门山系的中高山地带,龙胆溪自西向东从滑坡坡脚通过,并对坡脚产生强烈的冲刷切割作用。龙胆溪丰水期流量  $0.8 \text{ m}^3/\text{s}$ ,平水期  $0.2 \text{ m}^3/\text{s} \sim 0.3 \text{ m}^3/\text{s}$ ,枯水期仅为  $0.06 \text{ m}^3/\text{s} \sim 0.1 \text{ m}^3/\text{s}$ ,而暴雨季节水量暴涨,如 1997 - 08 的洪水流量可达  $5 \text{ m}^3/\text{s} \sim 6 \text{ m}^3/\text{s}$ 。滑坡区平均气温  $15.1^\circ\text{C}$ ,常年多雨多雾,山坡时常处于潮湿状态。根据天全县气象资料,当地多年平均年降雨量为 1 731 mm,最大年降雨量 2 341.8 mm,日最大降雨量为 164 mm,雨季多发生于 7 月 ~ 9 月。滑坡区主要以二郎山主干断裂带为其地质构造背景,该主干断裂带总体走向为 NE,倾向 NW,是龙门山主中央断裂带的南西段延伸部分,其性质为压扭性逆冲断层,在剖面上呈叠瓦状构造。断裂带两侧发育一系列与其平行的次级断层。滑坡区构造活动主要分为四期:第一期为  $\text{NE}20^\circ \sim 30^\circ$  的龙胆溪背斜构造;第二期是与公路近于垂直或斜交

的山体短轴构造;第三期主要指  $\text{NE}50^\circ \sim 60^\circ$  及近东西向的断裂带,受此构造影响,地貌上形成台阶状地形,相应地也形成多级分布的基岩台坎或不连续结构面,这种台坎或不连续面是构成滑坡变形的主要依附后缘;第四期主要是  $\text{NW}20^\circ \sim 50^\circ$  逆时针扭动的构造,该断层及其影响带构成控制滑坡区分块及左右边界的依附面。本区新构造运动以强烈上升为主,且该区地震活动较频繁,地震烈度为 VIII 度。

组成坡体的主要地层是志留系罗惹坪组下段钙质泥岩,其次是冲洪坡积物和崩坡积物。

1. 崩坡积物 ( $Q_4^{\text{col+dl}}$ ): 土黄色,组成物质为块石、碎石土及角砾土,含有腐殖质及粘性土。

2. 志留系罗惹坪组下段钙质泥岩 ( $S_2^1$ ): 灰、灰绿及灰黑色,中、厚层状,致密,较坚硬。

3. 冲洪积层 ( $Q_4^{\text{al+pl}}$ ): 主要组成物质为漂石、块石的泥岩、钙质泥岩、砂岩等。

滑坡区水文地质条件比较单一,降雨及地表水渗透形成地下水,且以基岩裂隙水、孔隙水为主,坡体表层存在上层滞水。

## 2 滑坡的基本特征

### 2.1 滑坡概貌及分区

该滑坡位于二郎山东坡龙胆溪右岸,当地山势陡峻,为龙门山系的中高山地带。勘探结果反映滑坡的性质为破碎岩石滑坡,它由上部崩坡积物和下部破碎岩石组成滑体,沿着由缓倾角结构面形成的泥化层蠕动下滑,从而引起公路产生严重的变形,滑坡区的坡体在区域性地质构造的影响下形成当地山

收稿日期:2002-09-25。

作者简介:刘小丽(1974-),女(汉族),河北保定人,博士研究生,主要从事岩土工程及滑坡防治方面的研究。电话:(028)86467080。

体的构造格局,在里程 K2 729 + 920 ~ K2 731 + 787 近两公里的路段内,可划分为 1 #、2 # 和 3 # 滑坡区。

1 # 滑坡区对应的公路里程为 K2 729 + 920 ~ K2 730 + 425,由于 NW30°左右的构造切割东-近东西向分布的基岩台坎,使其不连续且有一定的夹角,将 1 # 滑坡又分为东条块和西条块两个滑坡,东块滑坡对应 K2 729 + 920 ~ K2 730 + 165 路段;西块滑坡则对应 K2 730 + 166 ~ K2 730 + 425 路段,该块相对于东块而言规模大,滑面深,稳定性差,是整个滑坡的最危险滑坡区。1 # 滑坡总体范围前缘宽约 700 m,长 350 m,最深滑面已达地面以下 40 m 左右,体积逾 500 万 m<sup>3</sup>,属于特大型破碎岩石牵引式滑

坡。2 #、3 # 滑坡距 1 # 滑坡上游约 1.5 km,位于 K2 730 + 390 ~ K2 731 + 790 处,其总体范围,前缘宽约 400 m,长 200 m,体积近 100 万 m<sup>3</sup>,属特大型破碎岩石边坡滑坡,其中 2 # 滑坡区对应的公路里程为 K2 730 + 392 ~ K2 730 + 532。

## 2.2 滑坡的典型结构特征

该滑坡的坡体结构较为复杂,以公路为界,可分为上级和下级滑坡,而下级滑坡中又可分为浅、中、深等多层滑动,同时坡体中又同时存在若干大的节理裂隙和断裂。现以变形最严重的 1 # 滑坡西块 VI ~ VI 断面(位于 K2 730 + 282 处)为例对滑坡的结构特征作大致的说明,参见图 1。

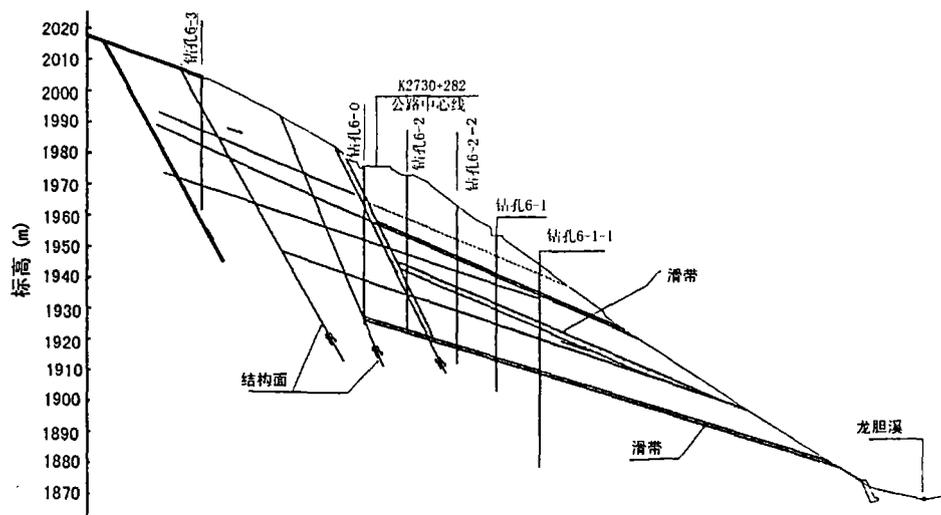


图 1 滑坡典型断面示意图

Fig.1 Typical profile of the landslide

据钻孔和挖桩资料知,组成滑坡体的物质由上至下依次为崩坡积物、破碎岩石、中厚层状钙质泥岩。图中亦显示出三层滑带的形状和位置,如图中填充部分所示。根据钻孔 6-1(孔口标高 1 953.0 m,测深 47 m)的资料,各滑动变形带的位置如下:其一在孔口以下 6.0 m ~ 11.5 m,对应标高 1 947.0 m ~ 1 941.5 m,其二为孔口以下 22.0 m ~ 26.0 m,其三为孔口以下 36.0 m ~ 39.0 m 处,对应标高 1917.0 m ~ 1914.0 m。

浅层滑面起伏,粗糙,主要由岩屑、软化泥及少量次生泥构成,为属岩块岩屑夹泥型结构面。中层滑面微起伏,粗糙,主要由断层泥、次生泥及角粒状

岩屑构成,为泥化夹层型结构面。深层滑面平直、粗糙,见阶步及倾向擦痕,整体呈灰褐色,主要由角粒状岩块、岩屑及软化泥构成,为岩块岩屑夹泥型结构面。

除了几条主要的滑带外,还有一些大的断裂和裂缝,如图 1 中所示。

## 2.3 滑坡的变形状态及发展趋势

自 1997-07-08 的雨季后,1 # 滑坡西块开始产生整体下沉和位移,东块公路上长达 60 m 锯齿状裂缝形成。1998-10-04 大雨过后,西块开始加剧下沉和变形,下沉量由原 1.3 m 增加至 1.6 m,公路内侧环形裂缝完全贯通,裂缝宽度及下沉量均达到

0.5 m 以上,该滑坡深部位移监测孔 6-2 孔也因位移过大而被剪断。东块裂缝也于 10 月 4 日大雨后急剧发展,后缘裂缝长度由原 60 多 m 延长到 80 多 m,拉开 0.2 m,下沉 0.28 m。至此包括东西两块滑坡在内的 1# 滑坡已经失稳,并开始处于整体滑动的蓄势阶段。

2#、3# 滑坡自 1997-07~08 的雨季至今,路基外侧严重坍塌,90 m 路面悬空,最大悬空深度已超过半幅路面,此滑坡虽然在规模及活跃程度上不及 1# 滑坡,但就运输安全上讲是相对危险的。从

最不利滑面分析情况看,1# 滑坡的东块滑坡目前主要是浅层滑动,西块滑坡的滑面相对较深,已达 40 m 左右,两块滑坡尽管更深处也有变形迹象,但仍处于蠕动挤压阶段,尚未使滑面贯通。从表 1 西块滑坡 VI~VI 断面中监测孔 6-1、6-3(位置见图 1)的位移监测成果中,也可看出最危险滑坡部位的变形发展趋势,纵观西滑坡的变形状况,6-1 孔变形最大,6-3 孔变形很小,说明该滑坡目前主要以前级滑坡的浅层变形为主,且呈发展趋势,而深层变形带仍处于蠕动变形阶段。

表 1 西块滑坡监测孔位置的滑带累积位移(mm)

Table 1 Cumulative displacement of the slide zone at monitor bore of the western landslide(mm)

观测时间	不同滑带位置的累积位移量				
	钻孔 6-1 不同滑带			钻孔 6-2 不同滑带	
	6.0m~11.5m	22.0m~26.0m	36.0m~39.0m	20.0m~23.0m	34.0m~35.0m
1999-12-05	250.0	150.0	132.0	24.0	12.0
2000-04-14	256.65	152.58	138.65	24.99	12.20
2000-08-20	265.29	153.95	141.15	26.32	12.88
2000-09-11	270.35	153.82	141.63	26.36	13.01
2000-10-23	277.91	153.57	143.15	27.10	13.21
2000-11-11	282.62	154.16	144.76	27.51	13.46

1999 年和 2000 年的两年时间里,经过局部滑动的滑坡一方面由于其滑动中势能的降低和滑带强度指标的改善,另一方面由于这两年雨水相对减少,所以使处于加速变形的滑坡变形速度有所减缓,但从深部位移动态监测成果可知它们仍处于快慢交替的不断变形过程中,照此下去,该滑坡必将产生整体大规模滑动,从而使公路遭到彻底的毁坏。

经过监测资料的分析 and 详细的勘探工作以及计算论证,确定出本滑坡的稳定度大致为:对一般变形迹象不太明显的深层滑面,稳定度在 1.0~1.04 之间,而变形迹象较明显的浅层滑面,稳定度在 0.97~1.0 之间,其他则介于以上稳定度之间。

### 3 滑坡的滑动机理分析

#### 3.1 滑坡的影响因素

该滑坡产生滑动的因素是多方面的,通过地质勘查、长期的变形监测资料及计算分析、工程类比等方法,确定滑坡的影响因素主要有以下方面。

1. 复杂的地质条件为滑坡的产生提供了坚实的

地质基础。NE 走向的台坎或不连续面成了滑坡的主要依附后缘,而 NW 走向的断层及其影响带又客观的控制了滑坡的变形侧界。从盘位上看,滑坡体既是 NE 走向断层的上盘,同时又是 NW 走向断层的上盘,加上志留系岩性较老,经过了许多次大大小小的构造运动,岩体支离破碎,其中较缓(20°左右)的构造面成为滑坡失稳的底界。同时由于滑体物质相对松散,也为滑坡的失稳破坏准备了充分的物质基础。

2. 龙胆溪溪水的长期冲刷作用,尤其是雨季下大暴雨时,对公路下方坡体岸坡的冲刷侵蚀作用很强,特别是 1997-07~08 月份龙胆溪泥石流巨大的冲刷和公路对岸溪流的巨大顶冲作用,破坏了坡体前部仅有的一点支撑,成为该滑坡失稳的主要因素之一。

3. 雨水的影响。雨水对滑坡的主要作用有 3 个方面,其一是对滑坡体物理、力学性质的改变,如泥化、软化滑带,降低坡体的抗剪强度,同时又增大坡体的容重,起到了一个加载的作用,从而一方面降低了抗滑

力,另一方面又增大了下滑力,易造成坡体失稳;其二是增大了岩体中的孔隙水压力、浮托力等,这种作用虽是暂时的,但有时会成为主导因素,不可忽视;其三是雨水入渗过程中产生的渗透力和雨水对坡体表层的强烈的剥蚀作用。此次滑坡的发生主要原因之一就是雨水的综合影响,上述三个方面都起到了一定的作用而尤以第一方面的作用最为明显。

4. 该滑坡属于牵引式滑坡,由于前级滑坡的变形加剧从而引起后级滑坡的不断变形,而后级滑坡的发展又促进了前级滑坡的进一步发展,这也是造成滑坡失稳的主要因素之一。

5. 坡体表面植被的严重破坏。该滑坡段在 90 年代以前的坡面植被较好,树木茂盛,而坡体也未出现过失稳现象,由于近年来当地居民的乱砍乱伐,造成现在坡面上的植被稀少,因此,坡体表面植被的破坏,也不能不说是引起滑坡失稳的原因之一<sup>[1,2]</sup>。

6. 其他一些因素的影响,如坡体的风化作用、地下水季节性变化、温差效应、岩体的重力作用<sup>[3]</sup>等都是对滑坡体起长期作用的一些外因。

### 3.2 滑动机理分析

该滑坡的发生是上述诸因素的综合作用结果,其中地质因素是基础,而龙胆溪泥石流的巨大冲刷和暴雨的入渗是滑坡的主要促发因素,该滑坡总体上是大型牵引式滑坡,现在以变形最严重的 1# 滑坡西块为例对其典型滑动机理进行分析。

在龙胆溪溪水冲刷、切割坡脚,尤其是泥石流的巨大冲刷作用下,滑坡坡体的前缘失去支撑,从而引起坡体表面松散堆积层的滑塌失稳,加之雨水入渗滑带首先是对浅层滑带的影响较大,特别是使坡体及滑带的抗剪强度降低,促使坡体的前级滑坡浅层变形较为严重,而浅层坡体的变形松弛使雨水更易渗入中层滑带,降低其抗剪强度,增大下滑力<sup>[4]</sup>,从而促使前级滑坡中层坡体的变形开始发展,与此同时,前级滑坡的浅层和中层部位变形的不断发展又牵动后级滑坡的不断变形,后级滑坡的不稳定又对前级滑坡的发展起了一个推动作用,随着坡体变形的发展,以及雨季的频繁降雨,使雨水逐步入渗到深层滑带变形体部位,致使深部岩体开始发展到现在的蠕动挤压变形阶段。随着时间的不断发展,各种影响因素的交替作用,使滑坡处于快慢交替的不断变形过程中。从目前的监测资料和各种因素的分析,如果任其发展,必将发生大规模的滑坡。这种河

水冲刷坡脚、雨水入渗由蠕动挤压形成滑坡的滑动机理在文献<sup>[5]</sup>中也作了类似介绍。

## 4 滑坡的整治方案

滑坡整治工程方案设计主要是在工程地质勘察报告、补充勘察报告及三年来滑坡深部位移监测资料分析的基础上完成的,经反复修改而日臻完善。针对滑坡的发生发展特征及其各影响因素,采取了支挡、锚固、排水三种综合治理工程措施,这些措施包括预应力锚索抗滑桩、普通抗滑桩、锚索框架、坡脚挡墙和路外侧两大急流槽在内的截排水沟。其中的坡脚挡墙作为应急工程已经施工完毕。

### 1. 预应力锚索抗滑桩

预应力锚索桩设计在 1# 滑坡整治工程中。K2 730 + 166 ~ K2 730 + 425 是该滑坡最活跃、路基破坏最严重的地段,滑面分层最多,推力大,路外侧坍塌又比较严重,是重点整治范围,所以在此采用预应力锚索桩。在 K2 730 + 163 ~ K2 730 + 420 范围内共设 43 根预应力锚索抗滑桩,均位于一排,锚索桩中 ~ 中间距为 6 m。初步设计为三种类型,其中 MZ1 型 20 根,埋深 41.5 m, MZ2 型 11 根,埋深 45.5 m, MZ3 型 12 根,埋深 49.5 m,其埋深还可根据实际开挖的具体地质条件进行相应的调整。桩截面均为 2.1 m × 3.2 m,在桩头设 4 束锚索,分居两排,每束锚索都由 12 根  $\phi_15$  钢绞线组成,俯角 28° ~ 32°,锚索长 53 m ~ 61 m,锚固段长 14 m,设计拉力 1 200 kN。桩身材料采用 C25 级钢筋混凝土,护壁采用 C20 级钢筋混凝土,护壁厚 0.25 m。

### 2. 普通抗滑桩

1# 滑坡的普通抗滑桩设在东块滑坡靠近西块滑坡的公路外侧,共计 15 根,桩截面 1.8 m × 2.4 m,桩长 26.5 m,桩间距 8 m,还可根据实际情况进行调整。护壁厚 0.2 m,桩身和护壁均采用 C20 钢筋混凝土。

### 3. 预应力锚索框架

锚索框架所用锚具采用 OVM 系列锚具,锚具型号分别采用 OVM15 - 9 型、OVM15 - 12 型。1# 滑坡锚索框架分公路内、外侧两排,2#、3# 滑坡设在公路的外侧。公路内侧的小框架(两横梁式)锚索每束由 9 根  $\phi_15$  钢绞线组成,设计拉力为 900 kN;公路内外侧大框架(三横梁式)由 12 根  $\phi_15$  钢绞线组成,设计拉力 1 200 kN。框架尺寸为:肋柱为 0.8 m × 1.0 m,横梁为 0.6 × 0.6 m,采用 C25 钢筋混凝土。

#### 4. 截排水沟

1# 滑坡截排水沟对于边坡病害体的稳定是非常必要的,是滑坡整治工程的重要组成部分,工程小而作用大。截排水沟分坡体外和坡体内两种,坡体外截排水沟两条,滑坡体内截排水沟两组,两种截排水沟共计 950 m; 2#, 3# 滑坡截排水沟分两种,共计 604 m。

#### 5. 滑坡坡脚挡墙

滑坡坡脚挡墙是滑坡整治工程的重要组成部分。滑坡坡脚挡墙不同于一般挡墙,它兼顾坡脚支挡和防冲刷的双重作用,是防止路堤继续冲刷失稳进而导致抗滑桩(或框架)工程失效的必要措施。墙底由最低河床面控制,一般位于最低河床面以下 2 m。

坡脚挡墙设计一般高 7 m,顶宽均为 1.4 m,每 8 m 设一伸缩缝,共 90 块,计 720 m 长。坡脚挡墙的墙体材料采用 C15 片石砼,已于 1999 年初全部施工完毕,目前正发挥着重要作用。

#### 6. 坡面处理及绿色环境保护

坡面处理是对整个工程的补充和完善。可作为坡脚挡墙和护坡施工的一部分,此处主要应做好清理坡面、补充裂缝等工作。绿色环境保护主要包括公路附近坡面植被的恢复和公路两侧的绿化,以及病害区特殊标志的设置。

## 5 结语

二郎山龙胆溪滑坡的环境地质条件、滑坡体的结构比较复杂,滑坡的规模大,对各种资料的分析显示该滑坡已处于极限平衡状态。滑坡的影响因素是多方面的,不同时期不同的因素交替起主导作用,是一个渐进发展的牵引式大型滑坡,其滑动机理具有代表性,所采取的综合整治工程措施也很具有典型性,在如此大规模的滑坡整治工程中采用预应力锚索抗滑桩和预应力锚索框架在国内外尚不多见,希望能为以后解决类似的滑坡问题积累经验,提供依据。

#### 参考文献:

- [1] 王深法,王援高,胡珍珍. 浙江山地滑坡现状及其成因[J]. 山地学报, 2000, 18(4): 373 ~ 376.
- [2] 查轩,黄少燕. 植被破坏对黄土高原加速侵蚀及土壤退化过程的影响[J]. 山地学报, 2001, 19(2): 109 ~ 114.
- [3] 王尚庆. 长江三峡滑坡监测预报, 第一版[M]. 北京: 地质出版社, 1999. 9 ~ 25.
- [4] 高加成. 减压沉并在滑坡治理工程中的应用[J]. 山地学报, 2000, 18(4): 369 ~ 372.
- [5] 张鲁新,周德培. 蠕动滑坡成因及隧道变形机理的分析[J]. 岩石力学与工程学报, 1999, 18(2): 217 ~ 222.

## The Sliding Mechanism and Treatment Measure of Longdanxi Landslide in Erlang Mountain

LIU Xiao-li and ZHOU De-pei

(Geotechnical Engineering Department of Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031 China)

**Abstract:** The landslide is located at the right bank of Longdanxi in the Erlang mountain where the Chuan-zang highway stretches. Since the rainstorms in July and August 1997, the rock-mass has been deformed badly and the highway has been settled largely. The deformation has been increasing, so it would destroy the road if the landslide weren't treated. Fortunately, the treatment project has been carrying. In this paper, according to the geological-geomorphic conditions and the structure of the slide-mass, the authors analyze factors resulting in the slide and thus propose the sliding mechanism, that is, the geological factor is the basis and the rainstorms and the erosion by Longdanxi are main activating factors. First, the foot of the slope was destroyed, then it led the upper to slide, at the same time, the strength for resisting slide has been reduced with the rain's pervasion, finally, the landslide occurred. To protect the road, the synthesis method including pre-stress anchor anti-pile and frame, the drainage groove and the vegetation has also been illustrated in the paper.

**Key words:** Longdanxi landslide; sliding mechanism; treatment measure